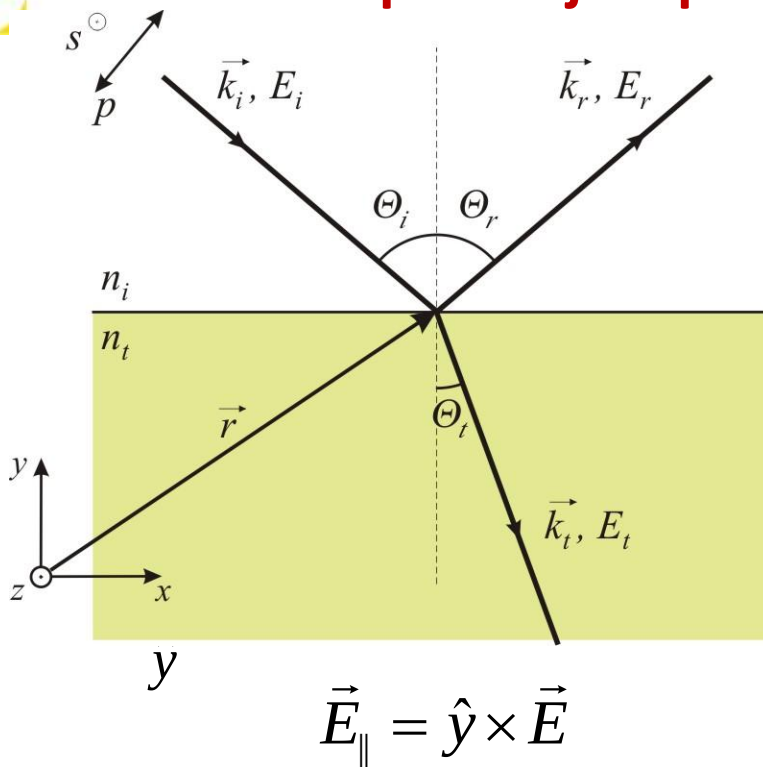




Światło na granicy ośrodków.



Padanie fali płaskiej na płaską granicę dielektryków



$$\vec{E}_i = \vec{E}_{0i} e^{i(\omega_i t - \vec{k}_i \cdot \vec{r})}$$

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{0r} e^{i(\omega_r t - \vec{k}_r \cdot \vec{r} + \varepsilon_r)}$$

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} e^{i(\omega_t t - \vec{k}_t \cdot \vec{r} + \varepsilon_t)}$$

równania Maxwella:

$\vec{H}_{\parallel}$ jest ciągłe na granicy

$\vec{E}_{\parallel}$ jest ciągłe na granicy

$$\vec{E}_{\parallel} = \hat{y} \times \vec{E}$$

$$\hat{y} \times \vec{E}_{0i} e^{i(\omega_i t - \vec{k}_i \cdot \vec{r})} + \hat{y} \times \vec{E}_{0r} e^{i(\omega_r t - \vec{k}_r \cdot \vec{r} + \varepsilon_r)} = \hat{y} \times \vec{E}_{0t} e^{i(\omega_t t - \vec{k}_t \cdot \vec{r} + \varepsilon_t)}$$

równanie musi być spełnione na granicy czyli dla wszystkich punktów $\vec{r} = [x, b, z]$ i dla dowolnego czasu t

- $\omega_r = \omega_t = \omega_i$
- $\vec{k} \cdot \vec{r}|_{y=b} = (\vec{k}_r \cdot \vec{r} + \varepsilon_r)|_{y=b} = (\vec{k}_t \cdot \vec{r} + \varepsilon_t)|_{y=b}, (\vec{k}_i - \vec{k}_r) \cdot \vec{r}|_{y=b} = \varepsilon_r = const$



Wzory Fresnela, interpretacja

r, t – współczynniki amplitudowe

polaryzacja **s** – E prostopadłe do płaszczyzny padania

$$r_{\perp} = \frac{E_{0r}}{E_{0i}} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$
$$t_{\perp} = \frac{E_{0t}}{E_{0i}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_t + \theta_i)}$$

polaryzacja **p** – E równoległe do płaszczyzny padania

$$r_{\parallel} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} = \frac{\operatorname{tg}(\theta_i - \theta_t)}{\operatorname{tg}(\theta_i + \theta_t)}$$
$$t_{\parallel} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_t + \theta_i) \cos(\theta_t - \theta_i)}$$

$$\overline{E}(\vec{r}, t) = E_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$$

$$E_{0i} \leftarrow \text{dane}$$

$$\left. \begin{array}{l} E_{0r} \\ E_{0t} \end{array} \right\} ?$$

$$\theta_r = \theta_i$$

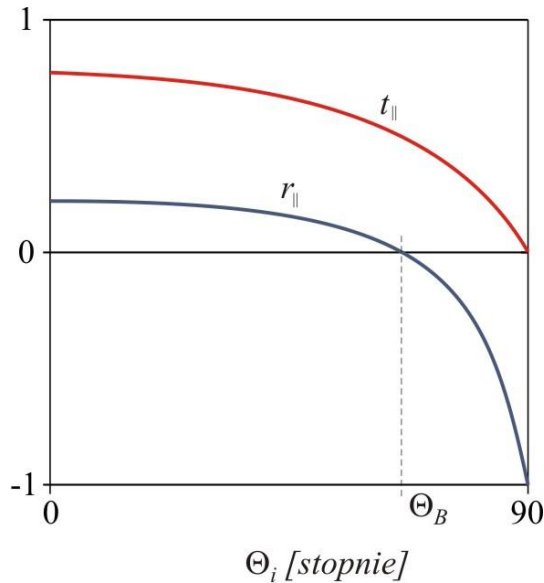
$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

przy padaniu normalnym:

$$\left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)^2 = \left(\frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \right)^2$$



Wzory Fresnela, granica powietrze – szkło



polaryzacja p

- $\theta_i = 0 \Rightarrow \theta_t = 0$

$$r_{||}(\theta_i = 0) = \frac{n_t - n_i}{n_t + n_i} = \frac{0.5}{2.5}$$

$$t_{||}(\theta_i = 0) = \frac{2n_i}{n_i + n_t} = \frac{2}{2.5} = \frac{4}{5}$$

$$n_i = 1 \quad n_t = 1,5$$

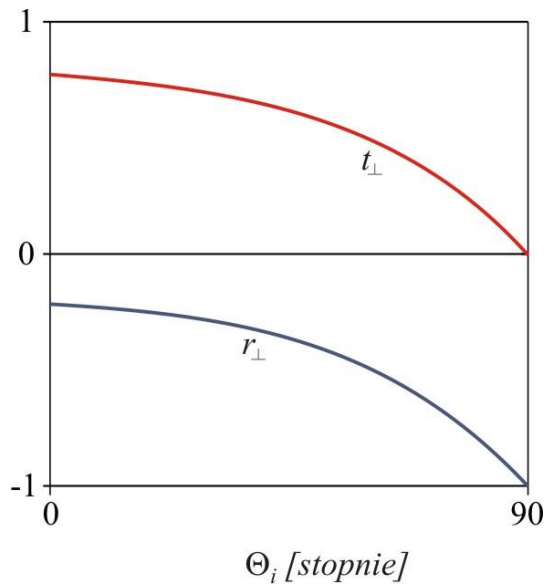
- $\theta_i = 90^\circ$

$$r_{||}(\theta_i = 90^\circ) = -1$$

$$t_{||}(\theta_i = 90^\circ) = 0$$

$$\theta_i + \theta_t = 90^\circ \Rightarrow r_{||} = 0$$

kąt Brewster'a θ_B



polaryzacja s

- $\theta_i = 0 \Rightarrow \theta_t = 0$

$$r_{\perp} = -\frac{1}{5}, \quad t_{\perp} = \frac{4}{5}$$

- $\theta_i = 90^\circ$

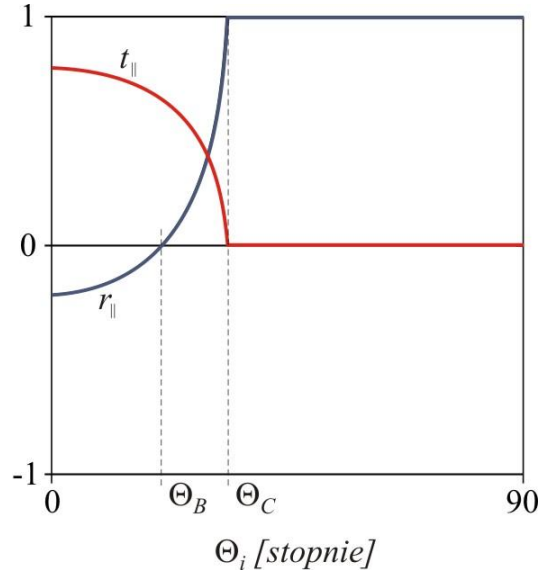
$$r_{\perp} = -1 \quad t_{\perp} = 0$$



Wzory Fresnela, c.d.

$$n_i = 1,5 \quad n_t = 1$$

polaryzacja p



$$\bullet \theta_i = \theta_t = 0$$

$$r_{||}(\theta_i = 0) = \frac{n_t - n_i}{n_t + n_i} = -\frac{1}{5}$$

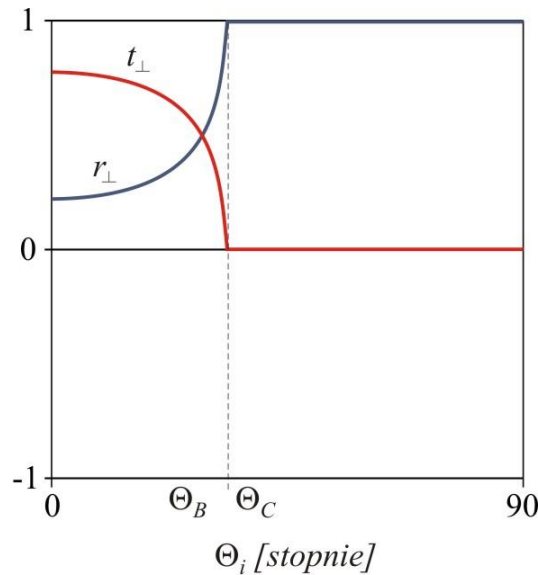
$$t_{||}(\theta_i = 0) = \frac{4}{5}$$

$$\bullet \theta_B \quad \operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_t}{n_i}$$

$$\bullet \theta_C \quad \sin \theta_C = \frac{n_t}{n_i}$$

$$\left. \begin{array}{l} \theta_i > \theta_C \\ r_{||} = 1, t_{||} = 0 \end{array} \right\} ?$$

polaryzacja s



$$\bullet \theta_i = 0$$

$$r_{\perp} = \frac{1}{5} \quad t_{\perp} = \frac{4}{5}$$

$$\bullet \theta_i = \theta_C$$

$$r_{\perp} = 1 \quad , \quad t_{\perp} = 0$$

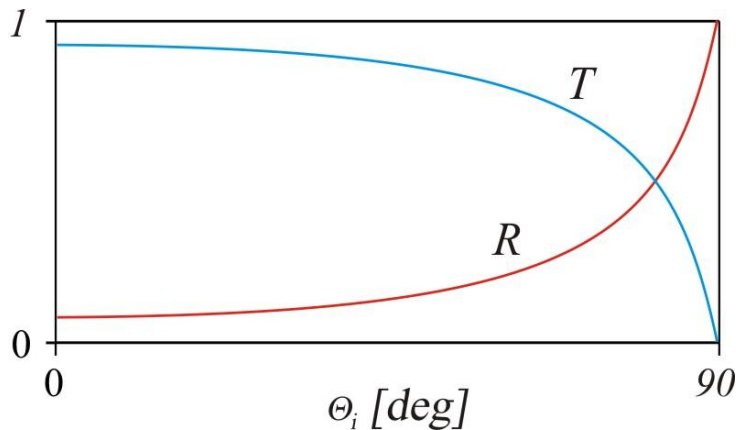
uwaga

$$\left. \begin{array}{l} n(\theta_i = 0) \\ \theta_B \\ \theta_C \end{array} \right\} \text{zależą od } n_i \text{ oraz } n_t$$

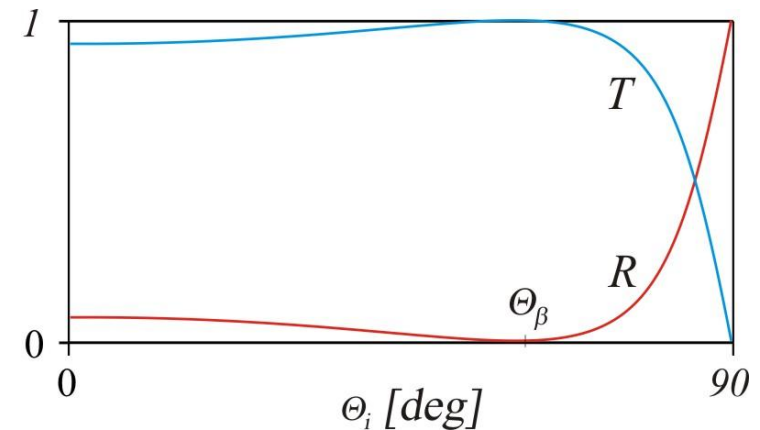


Natężeniowe współczynniki odbicia R i T

polaryzacja S



polaryzacja P



$$R(\theta_i = 0) = \left(\frac{n_t - n_i}{n_t + n_i} \right)^2$$

$$\operatorname{tg} \theta_\beta = \frac{n_t}{n_i}$$

powietrze – szkło (VIS)

$$\bullet n_i = 1, \quad n_t = 1.5$$

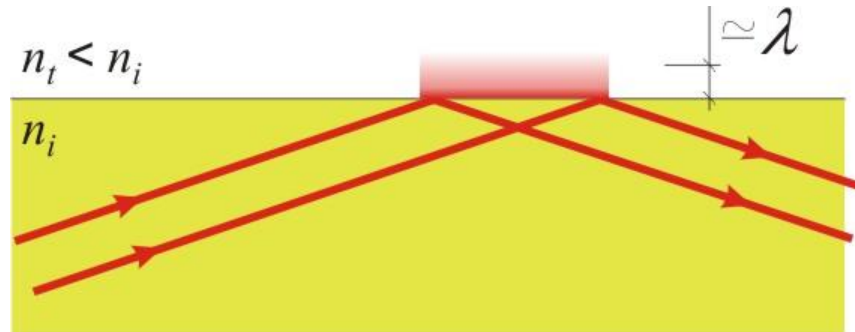
$$R(\theta_i = 0) = 0.04$$

powietrze – german (IR)

$$\bullet n_i = 1, \quad n_t = 4$$

$$R(\theta_i = 0) = \frac{9}{25} = 0.36$$

Fale ewanescentcyjne



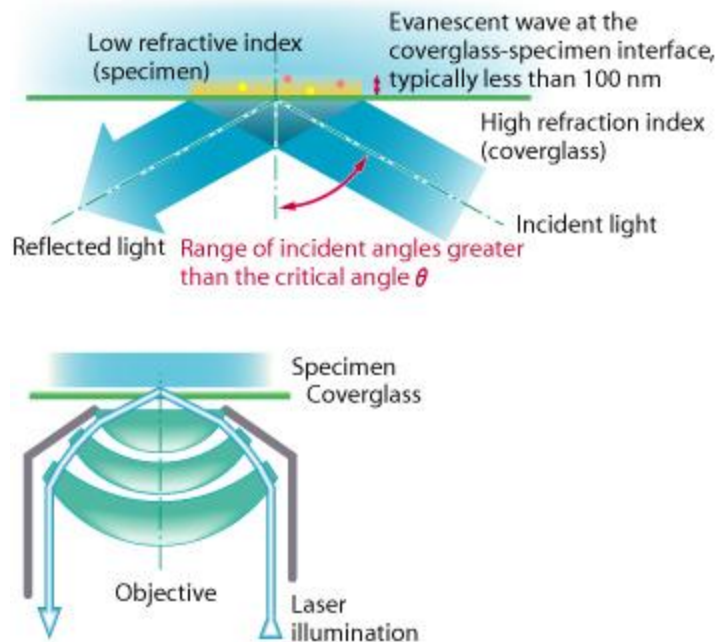
- propagacja równoległe do granicy ośrodków
- amplituda zanika eksponencjalnie
- głębokość wnikania $\sim 1/\alpha$
- energia nie przepływa do ośrodka rzadszego

$$\alpha = \frac{4\pi n_t}{\lambda_0} \sqrt{\left(\frac{n_i}{n_t} \sin \theta_i\right)^2 - 1}$$

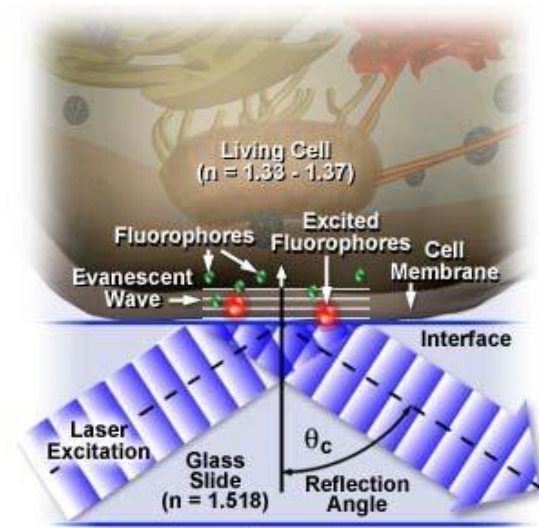
przykład: $n_i = 1.5, n_t = 1, \theta_i = 60^\circ \Rightarrow \frac{1}{\alpha} \approx \frac{\lambda_0}{9}$

kostka światłodzieląca

Technology focus – Total Internal Reflection Fluorescence Microscopy



© Nikon Inc.



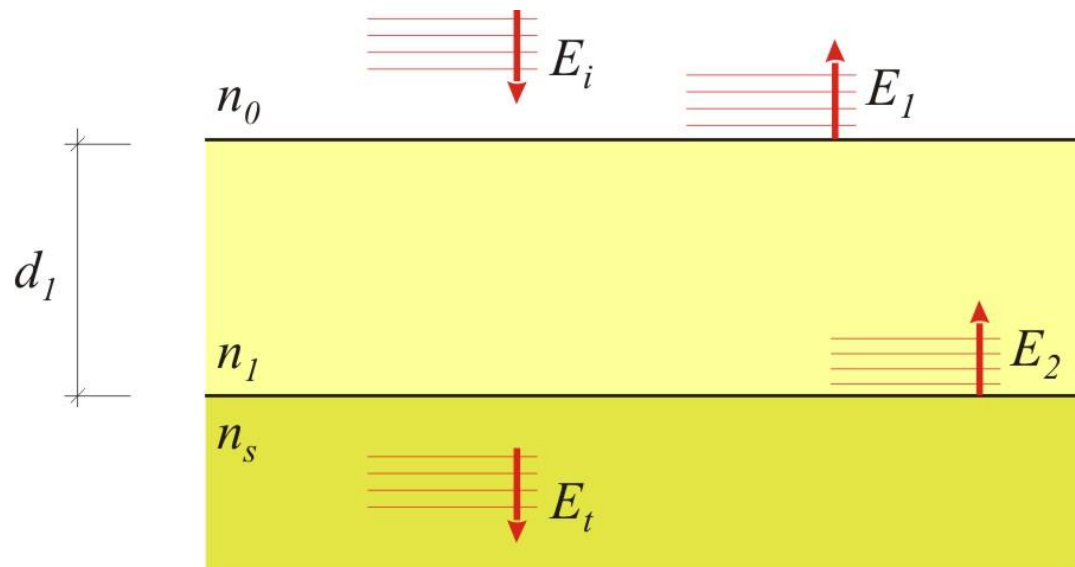
© Olympus Inc.

Advantages:

- no contribution from out-of-focus fluorescence from deeper in the sample,
- better z-axis resolution than confocal microscopy (100 nm vs. 500 nm),
- can track events exclusively at or just below cell membrane of live cells.

Pokrycia (warstwy) dielektryczne

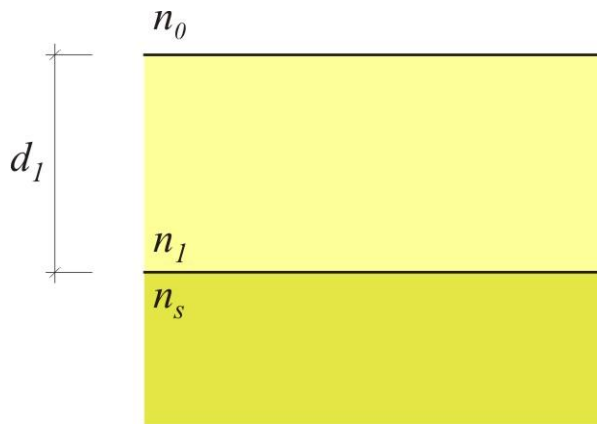
Czy można, nakładając przezroczyste warstwy o zadanej grubości, zmieniać współczynnik odbicia od granicy ośrodków?





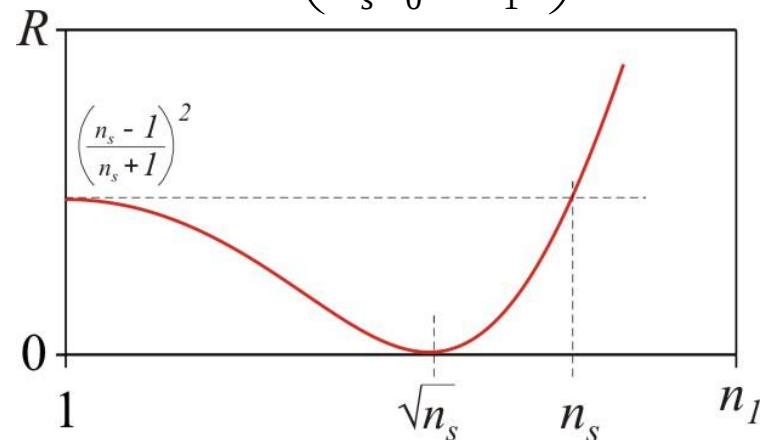
Ćwierćfalowa warstwa antyrefleksyjna

Czy można zaprojektować warstwę, która zredukuje (np. do zera) odbicie od granicy ośrodków?



$$n_1 d_1 = \frac{\lambda_0}{4}$$

$$R = |r|^2 = \left(\frac{n_s n_0 - n_1^2}{n_s n_0 + n_1^2} \right)^2$$



$$n_1 = \sqrt{n_s n_0} \Rightarrow R = 0$$

Czy da się to zrobić?

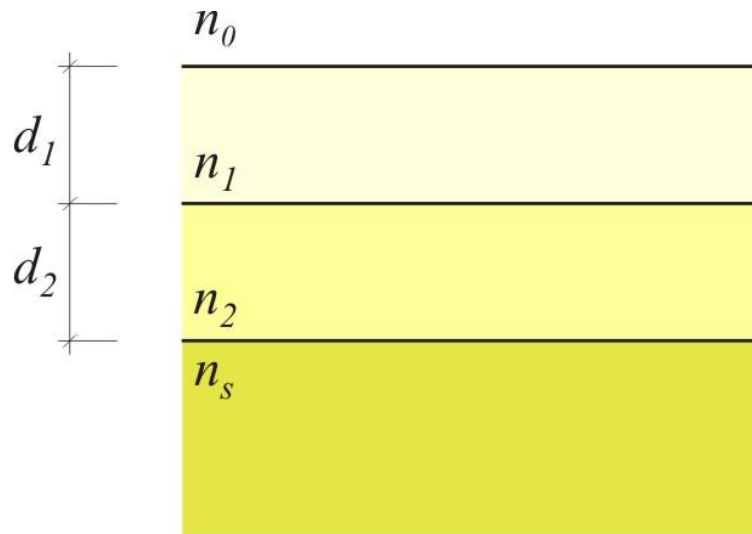
Dla szkła $n_s = 1,5$ w powietrzu ($n_0 = 1$) potrzeba $n_1 = 1,22$

Najmniejsze n z dostępnych materiałów ma MgF_2 - 1,38, co daje $R = 1,4\%$...



Więcej warstw

Może dwie warstwy?



$$n_1 d_1 = \frac{\lambda_0}{4} \quad n_2 d_2 = \frac{\lambda_0}{4}$$

$$R = 0 \quad \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 = \frac{n_s}{n_0}$$

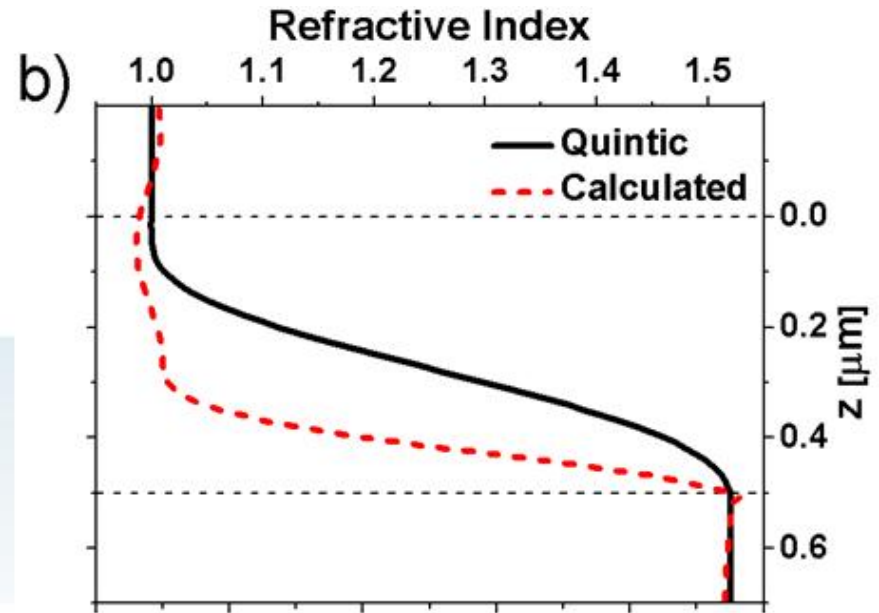
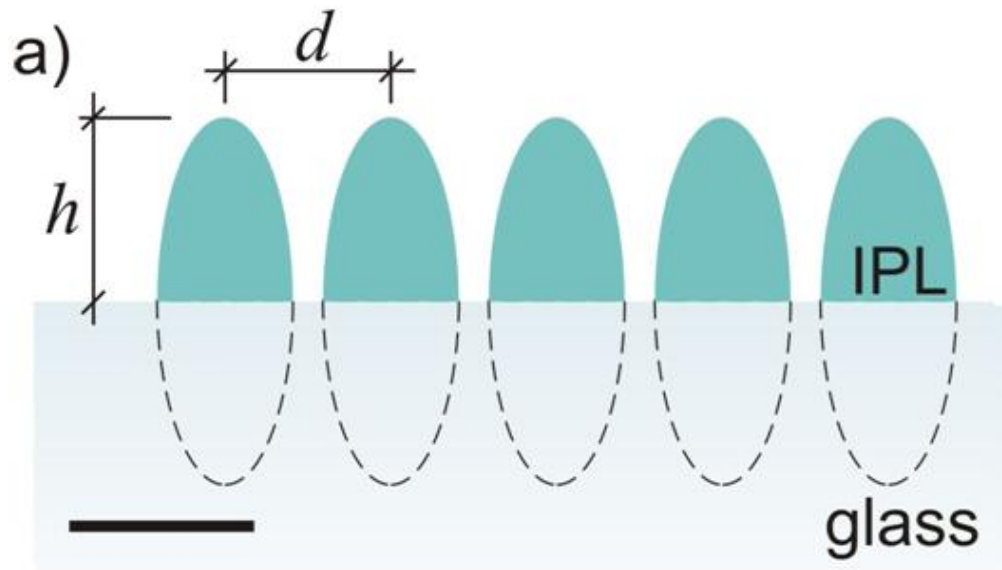
Dla szkła $n_s = 1,5$ w powietrzu ($n_0 = 1$)
dając ZrO₂ $n_2 = 2,1$ i CrF₂ $n_1 = 1,63$
można dostać $R = 0,25\%$

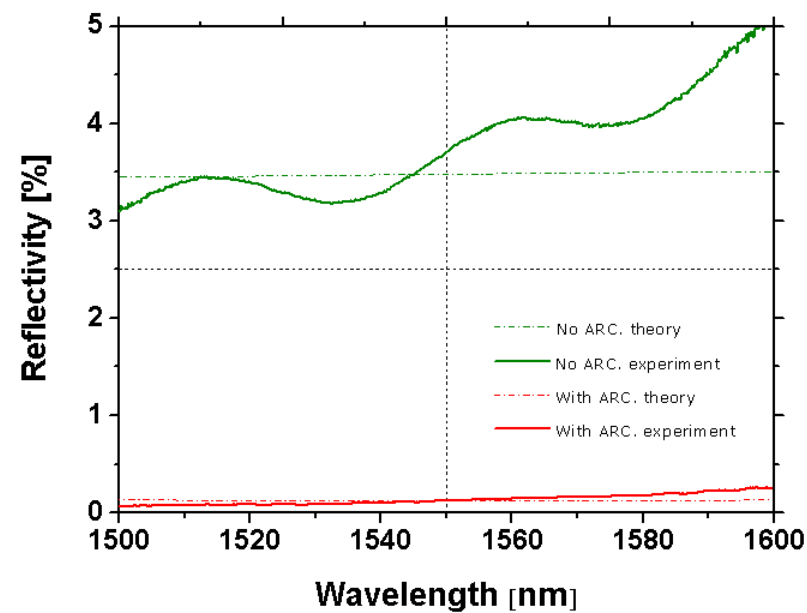
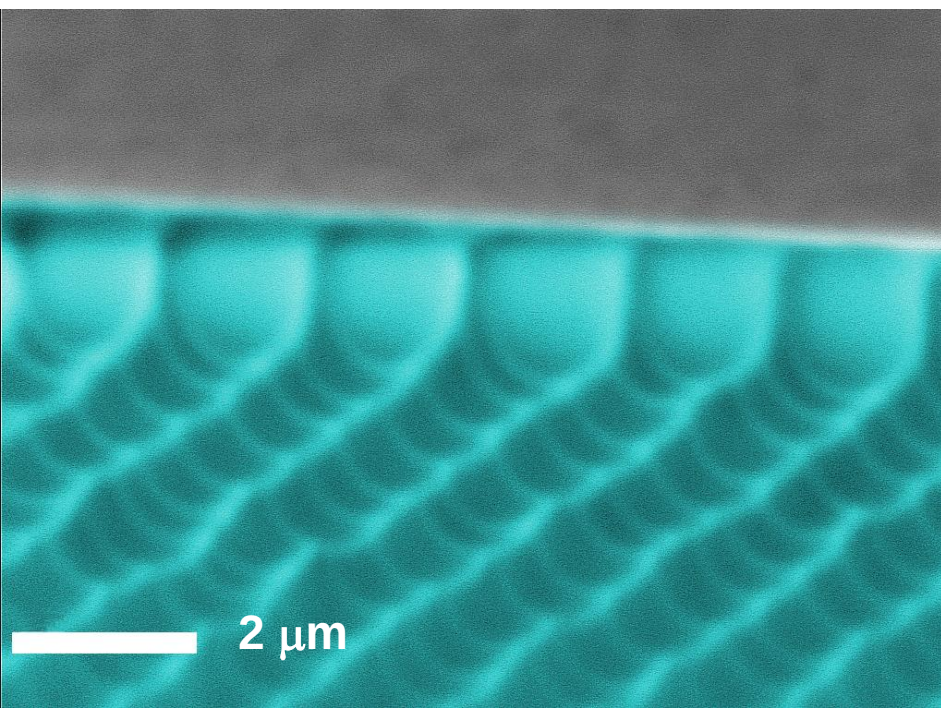
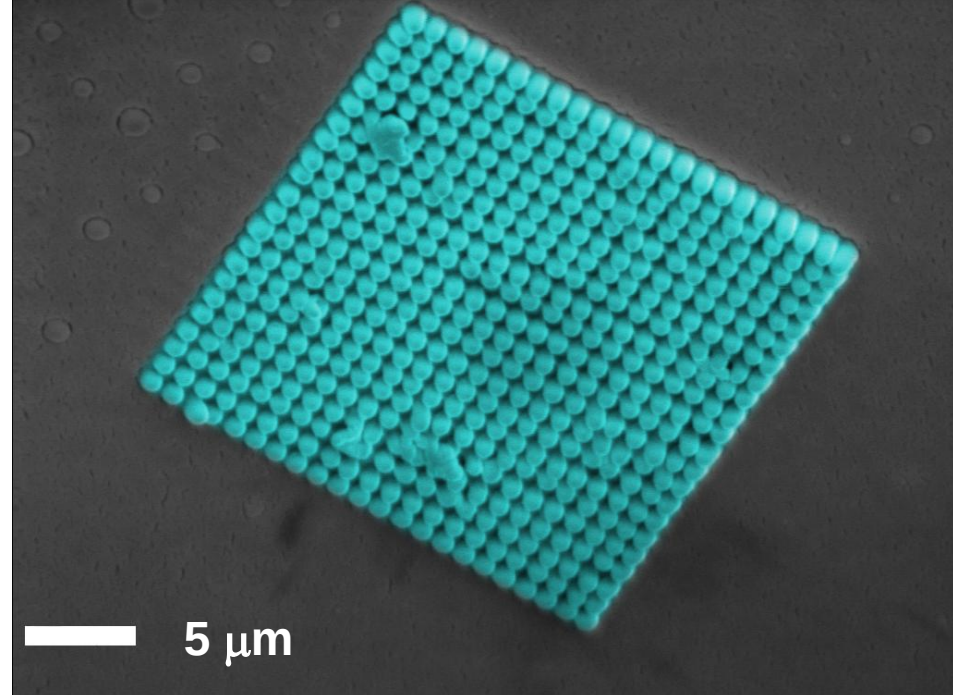
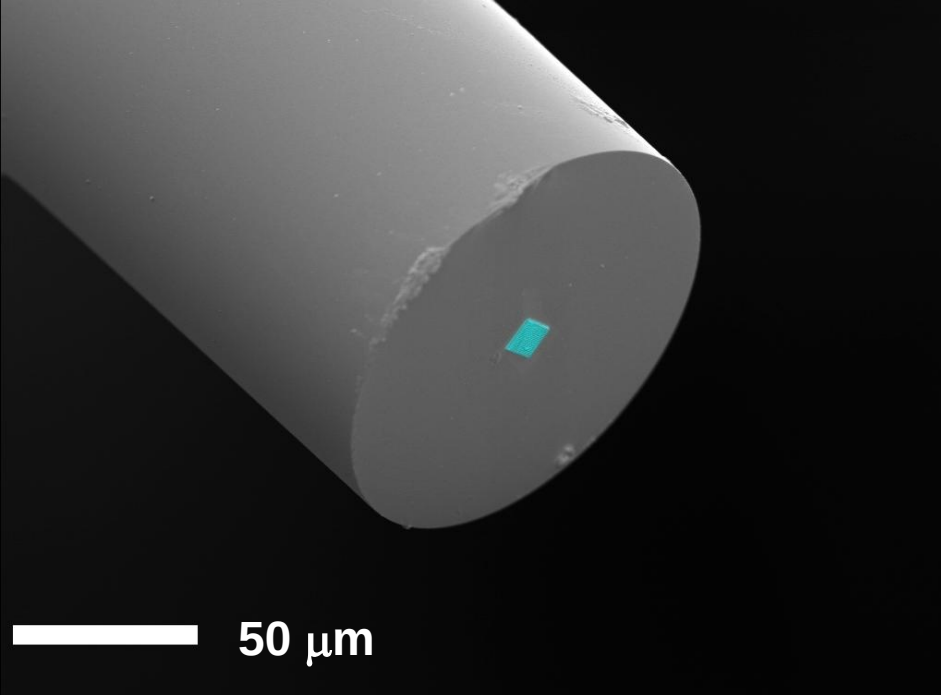


Technology focus – pokrycia gradientowe



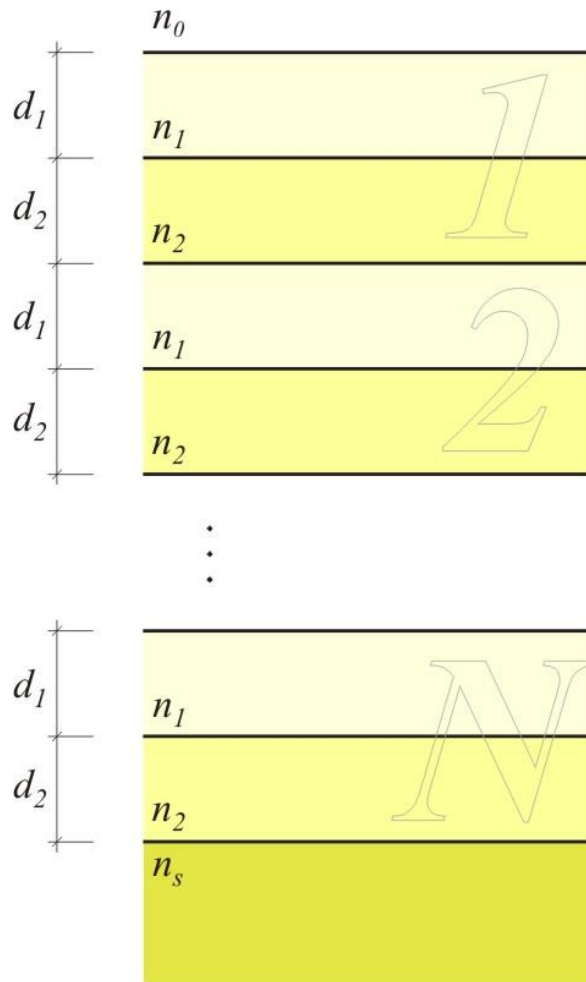
ODBICIE NA GRANICY OŚRODKÓW – STRUKTURY GRADIENTOWE





A duże odbicie (lustro)?

Wiele (N) par warstw na przemian



$$n_1 d_1 = \frac{\lambda_0}{4} \quad n_2 d_2 = \frac{\lambda_0}{4} \quad \frac{n_1}{n_2} = n_{12} > 1$$

$$R = \left(\frac{(n_s n_{12})^N - (n_0 n_{12})^{-N}}{(n_s n_{12})^N + (n_0 n_{12})^{-N}} \right)^2$$

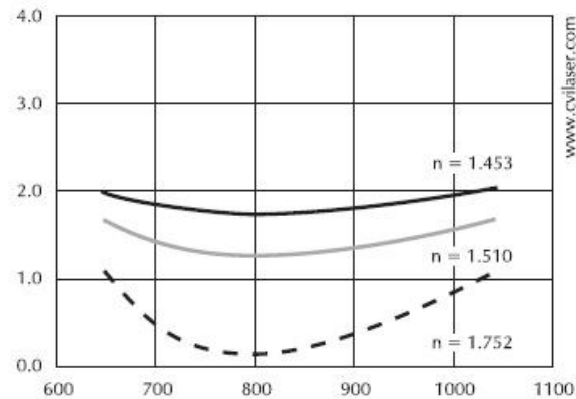
Dla szkła $n_s = 1,5$ w powietrzu ($n_0 = 1$)
dając $n_1 = 2,4$ i $n_2 = 1,45$
można dostać

$N=1$	$R=0,37$
$N=2$	$R=0,70$
$N=4$	$R=0,95$
$N=6$	$R=0,994$
$N=8$	$R=0,999$

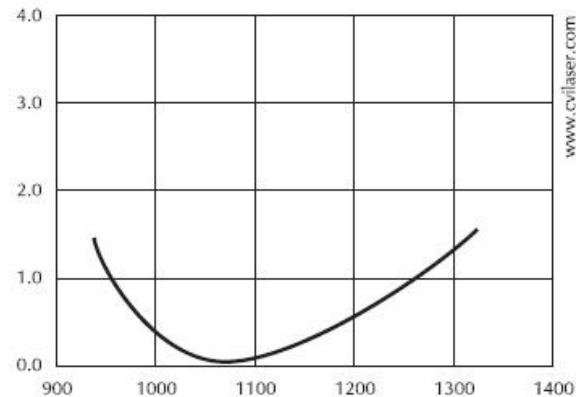
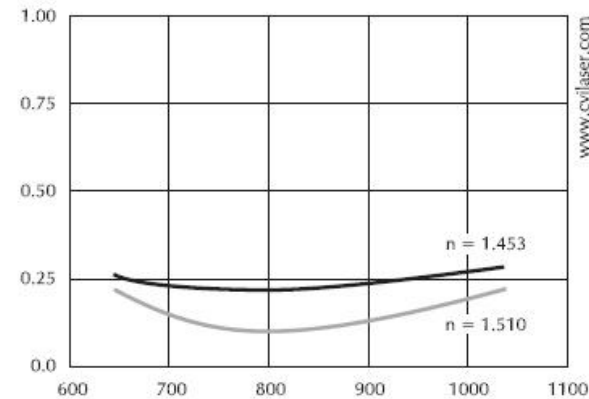


Pokrycia dielektryczne - przykłady

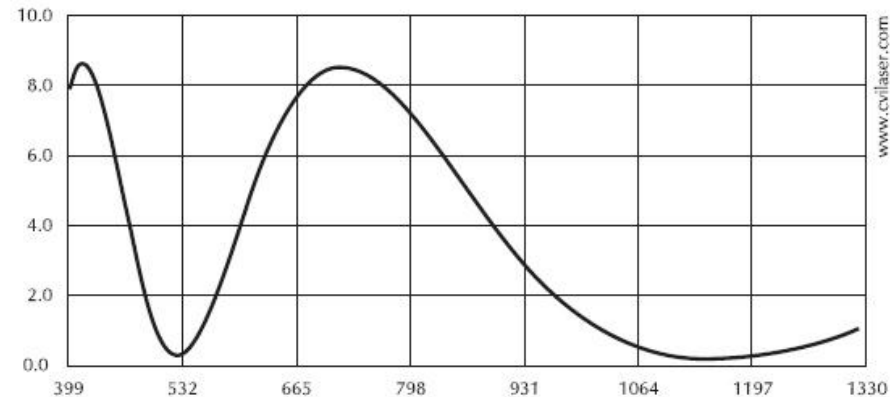
MgF₂ na różnych podłożach (0°)



MgF₂ na różnych podłożach (45°)



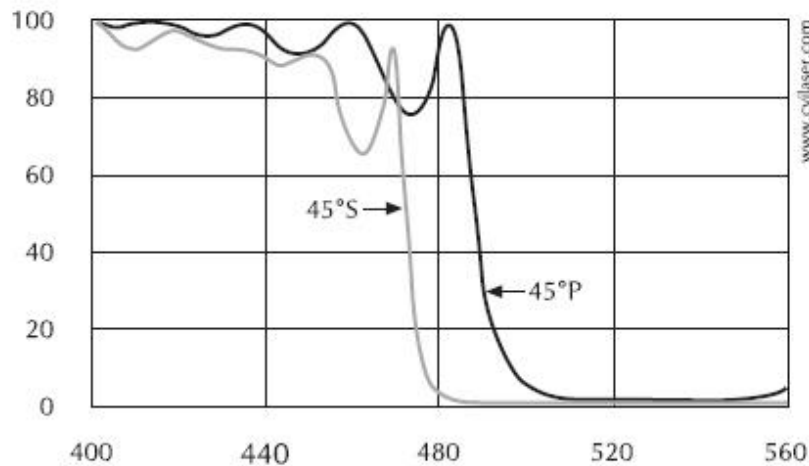
warstwa AR typu V dla 1064 nm



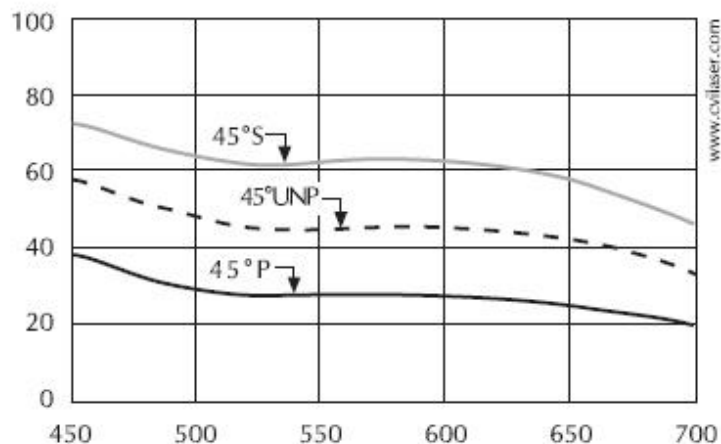
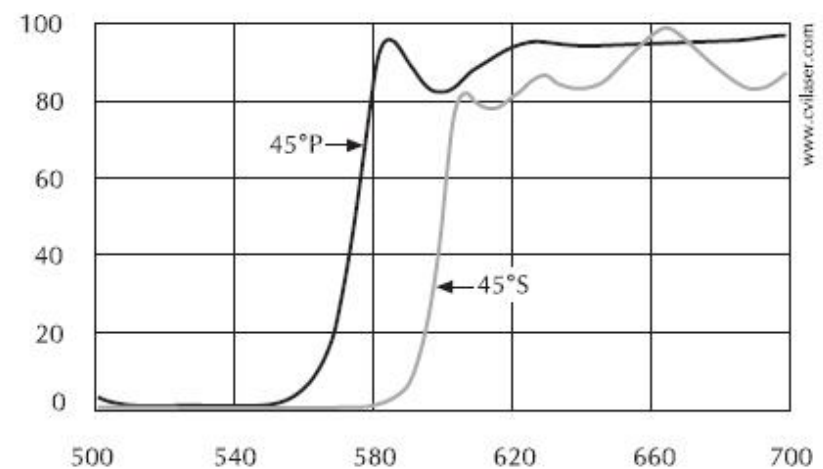
warstwa AR typu podwójne V dla 1064 i 532 nm

Pokrycia dielektryczne - przykłady

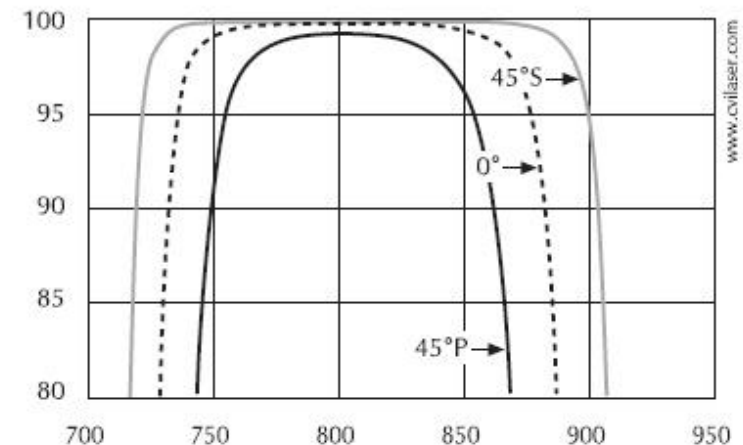
lustro dichroiczne long-pass



lustro dichroiczne short-pass



płytkę światłodzielną VIS



lustro szerokopasmowe NIR

Pokrycia z warstw metali



- dla metali istnieje częstość plazmowa, poniżej której metal odbija światło, zaś powyżej zachowuje się jak dielektryk,
- część energii przy odbiciu zamienia się na ciepło czyli podgrzewa lustro,
- dla niewielkiej grubości warstwy, fala wnika do metalu może przejść na drugą stronę – płytki półprzepuszczalne,
- najczęściej stosowane – srebro, aluminium, złoto (IR),
- niska cena, szerokie pasmo, duży zakres kątów.